

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平11-39814

(43)公開日 平成11年(1999)2月12日

(51)Int.Cl.^a

識別記号

G 11 B 21/10

F I

G 11 B 21/10

L

審査請求 未請求 請求項の数15 O L (全 16 頁)

(21)出願番号 特願平9-190119

(22)出願日 平成9年(1997)7月15日

(71)出願人 000003078

株式会社東芝

神奈川県川崎市幸区堀川町72番地

(72)発明者 谷津 正英

東京都青梅市末広町2丁目9番地 株式会

社東芝青梅工場内

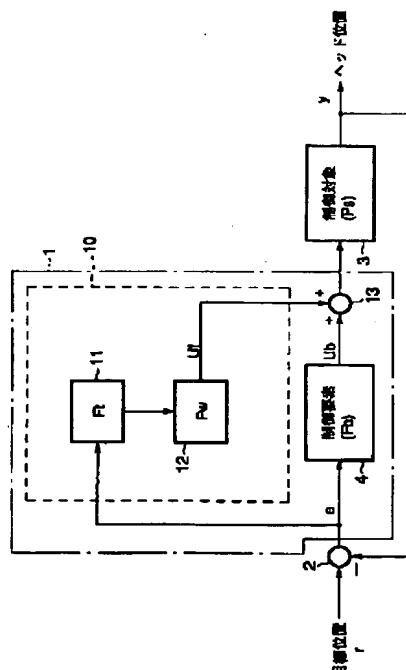
(74)代理人 弁理士 鈴江 武彦 (外6名)

(54)【発明の名称】 磁気ディスク装置

(57)【要約】

【課題】ヘッド位置決め制御システムにおいて、ディスクの回転に伴うトラックの偏心成分を十分に抑制できるようにして、ヘッドのトラックに対する追従誤差を低減して結果的にヘッドの位置決め精度を向上させることにある。

【解決手段】ヘッドの位置と目標位置との位置誤差に基づいて制御操作量 U_b を算出するフィードバック制御系と、位置誤差から偏心成分を検出して、除去するための制御操作量 U_f を算出するフィードフォワード制御系10とを併用したヘッド位置決め制御システムである。このシステムにより、ディスクの回転に伴う偏心成分を制御操作量 U_f により十分に抑制し、ヘッドの位置決め精度を向上させる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 ディスク上に記録したデータを読み出し、かつ前記ディスク上にデータを書込むためのヘッドを有し、前記ディスク上に予め記録したサーボ情報に基づいて前記ヘッドを前記ディスク上の目標位置に位置決め制御する制御手段を備えた磁気ディスク装置であって、前記制御手段は、

ヘッド位置決め制御時に、前記ディスクから前記ヘッドにより読み出されたサーボ情報から前記ヘッドの位置を検出するための位置情報を生成する手段と、

前記位置情報に基づいて前記ヘッドの位置と目標位置との位置誤差を検出するための位置誤差検出手段と、

前記位置誤差検出手段により検出された位置誤差に応じて前記ヘッドを前記目標位置に位置決めするための第1の制御操作量を算出する第1の算出手段と、

前記位置誤差検出手段により検出された位置誤差を観測し、前記位置誤差に含まれる前記ディスクの回転に伴う偏心成分を検出する偏心成分検出手段と、

前記偏心成分検出手段により検出された偏心成分を前記位置誤差から除去するための第2の制御操作量を算出する第2の算出手段と、

前記第1の制御操作量に対して前記第2の算出手段により算出された前記第2の制御操作量を加算して前記ヘッドの位置決め制御量として出力する出力手段とを具備し、

前記ヘッドを含む制御対象の伝達関数を(P_s)とし、前記第1の算出手段を含むフィードバック制御系の制御要素の伝達関数を(F_b)とし、前記偏心成分検出手段により検出された偏心成分を(e_0)とした場合に、前記第2の算出手段は、モデル式「 $U_f = ((1 + F_b \cdot P_s) / P_s) \cdot e_0$ 」を実行して前記第2の制御操作量(U_f)を算出するフィルタ手段として構成されていることを特徴とする磁気ディスク装置。

【請求項2】 前記偏心成分検出手段は、前記ディスクの回転に同期する周期偏心成分を検出する手段であることを特徴とする請求項1記載の磁気ディスク装置。

【請求項3】 前記偏心成分検出手段は、前記位置誤差の観測値をフーリエ変換処理を実行して、前記ディスクの回転に同期する周期偏心成分をフーリエ級数展開により算出する手段を有することを特徴とする請求項1記載の磁気ディスク装置。

【請求項4】 前記偏心成分検出手段により検出された前記偏心成分の値と予め用意した基準値とを比較して、前記偏心成分が位置誤差量として許容範囲内であるか否かを判別する判別手段と、

前記判別手段の判別結果により前記偏心成分が許容範囲内の場合には、前記第2の算出手段の機能を停止させる手段とを有することを特徴とする請求項1記載の磁気ディスク装置。

【請求項5】 前記偏心成分検出手段により検出された

前記偏心成分に基づいて抑制対象の偏心次数に対応する偏心成分を選定するための選定手段と、

前記選定手段により選定された偏心成分を除去するための前記第2の制御操作量を算出するよう第2の算出手段を制御する手段とを有することを特徴とする請求項1記載の磁気ディスク装置。

【請求項6】 前記ヘッドの目標位置である前記ディスク上のトラック情報に関する連付けて前記偏心成分検出手段により検出された前記偏心成分を記憶するメモリ手段と、

前記トラック情報に基づいて、前記メモリ手段に記憶された偏心成分または前記偏心成分検出手段により検出された偏心成分のいずれかを選択して前記第2の算出手段に入力させる選択手段とを有することを特徴とする請求項1記載の磁気ディスク装置。

【請求項7】 前記メモリ手段は、前記偏心成分検出手段により検出された前記偏心成分の中で、トラック間で相関のある偏心成分をトラック情報に関する連付けて記憶し、

前記選択手段はトラック情報に関する連付ける偏心成分を前記メモリ手段から検索して前記第2の算出手段に入力させて、前記メモリ手段に記憶されたトラック情報とは関連しないトラック情報の場合には前記偏心成分検出手段により検出された偏心成分を前記第2の算出手段に入力させることを特徴とする請求項6記載の磁気ディスク装置。

【請求項8】 前記ヘッドの目標位置である前記ディスク上のトラック情報に関する連付けて前記偏心成分検出手段により検出された前記偏心成分を記憶するメモリ手段と、

前記メモリ手段に記憶されたトラック情報毎の複数の偏心成分に基づいて、前記ヘッドの目標位置に対応する偏心成分を推定して前記第2の算出手段に入力させる推定手段とを有することを特徴とする請求項1記載の磁気ディスク装置。

【請求項9】 前記ヘッドの目標位置である前記ディスク上のトラック情報に関する連付けて前記偏心成分検出手段により検出された前記偏心成分を記憶するメモリ手段を有し、

前記偏心成分検出手段は、前記位置誤差の観測値をフーリエ変換処理を実行して、前記ディスクの回転に同期する周期偏心成分をフーリエ級数展開により算出有し、前記メモリ手段に記憶された偏心成分の値を初期値として使用する手段を有することを特徴とする請求項1記載の磁気ディスク装置。

【請求項10】 外部から与えられる衝撃を検出する衝撃検出手段と、

前記衝撃検出手段からの検出信号に応じて前記偏心成分検出手段の機能を停止させて、前記第2の制御操作量を含まない前記第1の制御操作量のみを前記ヘッドの位置

決め制御量として使用するように制御する手段とを有することを特徴とする請求項1記載の磁気ディスク装置。

【請求項11】前記位置誤差検出手段により検出された位置誤差を観測し、予め設定された基準値との比較結果に基づいて観測された位置誤差量が許容範囲外の場合には前記偏心成分検出手段及び前記第2の算出手段を機能させて、

前記位置誤差量が許容範囲内の場合には前記偏心成分検出手段及び前記第2の算出手段の機能を停止させて前記第1の制御操作量のみを前記ヘッドの位置決め制御量として使用するように制御する手段を有することを特徴とする請求項1記載の磁気ディスク装置。

【請求項12】前記位置誤差検出手段により検出された位置誤差を観測し、前記位置誤差量がデータの書き込み動作における許容範囲外の場合には前記偏心成分検出手段及び前記第2の算出手段を機能させて、

前記位置誤差量が許容範囲内の場合には前記偏心成分検出手段及び前記第2の算出手段の機能を停止させて、前記第1の制御操作量のみを前記ヘッドの位置決め制御量として使用するように制御する手段を有することを特徴とする請求項1記載の磁気ディスク装置。

【請求項13】前記メモリ手段は、前記ヘッドの目標位置である前記ディスク上のトラック情報を用いて前記ディスクのデータ面を意味するヘッド情報を関連付けて前記偏心成分検出手段により検出された前記偏心成分を記憶し、

前記選択手段は、前記ヘッドを目標位置に位置決めするときのトラック情報を用いて、前記メモリ手段に記憶された偏心成分または前記偏心成分検出手段により検出された偏心成分のいずれかを選択して前記第2の算出手段に入力させるとを有することを特徴とする請求項6記載の磁気ディスク装置。

【請求項14】前記ディスクは、実装される磁気ディスク装置以外のサーボ情報を書き込む専用装置により前記サーボ情報が予め書き込まれていることを特徴とする請求項1から請求項13記載の磁気ディスク装置。

【請求項15】前記偏心成分検出手段は、前記位置誤差の観測値に対してフーリエ変換処理を実行して、前記ディスクの回転に同期する周期偏心成分をフーリエ級数展開により算出する手段を有し、

前記フーリエ変換処理に使用する前記周期偏心成分に同期するサイン(sin)成分とコサイン(cos)成分とを演算した演算結果を予め記憶し、

前記演算結果を使用して前記フーリエ級数展開により前記周期偏心成分を算出するように構成されたことを特徴とする請求項1記載の磁気ディスク装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、特にハードディスク装置などの磁気ディスク装置に適用し、ディスク上に

予め記録されたサーボ情報に基づいてヘッドを目標位置に位置決め制御するためのヘッド位置決め制御システムに関する。

【0002】

【従来の技術】従来、例えばハードディスクドライブ(HDD)などの磁気ディスク装置は、磁気ヘッド(以下単にヘッドと称する)により記憶媒体であるディスク上にデータを書き込み、またディスクからデータを読み出すように構成されている。

【0003】ディスクは各データ面に同心円状の多数のトラック(シリンドラ)が配列されて、各トラックがそれぞれ複数のデータセクタに分割されている。HDDでは、ディスク上にはサーボ情報が記録されたサーボエリアが所定の間隔で設けられている。サーボ情報は大別して、トラックを識別するためのトラックコード(シリンドラコード)を示すトラック情報(またはシリンドラ情報)及びサーボバーストデータ(位置情報)からなる。

【0004】HDDでは、アクセス対象の目標トラック(目標位置)が決定されると、ヘッド位置決め制御システム(具体的にはCPUなどにより構成)は、ヘッドにより読み出されるサーボ情報を用いて、ヘッドを目標トラックまで移動制御し、かつ目標トラックの範囲内に位置決めるように追従制御する。

【0005】ヘッド位置決め制御システムのトラック追従制御は、概念的には図13に示すようなフィードバック制御系により実現されている。このフィードバック制御系は、目標位置 r と実際のヘッド位置 y との位置誤差 e を算出する位置誤差検出部(減算部)2と、システムのコントローラ(具体的にはCPU)の制御要素4と、ヘッドの移動機構である制御対象3とから構成されている。制御対象3とは具体的にはヘッドアクチュエータを駆動するためのボイスコイルモータ(VCM)である。ここで、制御要素4及び制御対象3の各伝達関数をそれぞれ「Fb」と「Ps」とする。

【0006】制御要素4は位置誤差 e を入力して、この位置誤差 e を解消するような制御操作量 Ub を算出する。このとき、制御要素4は、閉ループ系を安定化補償し、かつサーボ情報の偏差補償を行なうように制御操作量 Ub を算出する。ここで、安定化補償とは、システムの位相遅れを補償してループの安定化を行なうものであり、位相進み補償とも呼ばれる。具体的には、ゲインクロス周波数で、位相の遅れが「-180度」以下になると、制御ループが不安定になる。このため、制御ループ内にデジタルフィルタを設けて、ゲインクロス周波数で位相が進むような補償がなされる。

【0007】一方、偏差補償とは、ディスク上のトラックに記録されたサーボ情報とヘッドとの相対誤差を小さくして、ヘッドの位置決め精度を向上させるものである。具体的には、ヘッドを搭載しているヘッドアクチュエータは、ヘッドとヘッドアンプ間の信号伝送やVCM

に対する通電のためのFPC（フレキシブル・プリント・ケーブル）の歪みによる外力を常に受けている。また、ディスク上に記録されたサーボ情報は、ディスクの偏心によるトラック振れや、サーボ情報をディスクに書き込むときのスピンドルモータ（ディスクの回転機構）の振れ、スピンドルモータの回転振動などによって生ずる同期及び非同期な振れにより、常に位置変動を起こしている。このようなヘッドアクチュエータに加わる外力やトラック位置変動に対して、サーボ情報とヘッドとの相対誤差を低減させるために、制御ループ内に積分型のデジタルフィルタを設けて、ヘッドのトラック追従精度を向上させるための偏差補償がなされる。

【0008】ところで、ヘッドを追従させるべきディスク上のトラックには、特にディスクの回転に伴う要因により偏心が発生する。要因としては、ディスクを回転させるためのスピンドルモータの軸振れ、サーボ情報を書き込むときのディスクの振動、また周囲温度の変化によるディスク形状の伸縮などがある。また、ディスク上にサーボ情報を書き込むときに、ディスクを実装するHDD自体ではなく、サーボライタと呼ばれる専用のサーボ情報書き込み装置を使用することがある。このような場合には、サーボ情報を書き込んだディスクをHDDに装着したときに、スピンドルモータの回転中心と、サーボライタによりサーボ情報を書き込んだときのディスクの取り付け位置での回転中心との誤差により、巨大な偏心が発生する可能性がある。

【0009】このようなトラックの偏心に伴う振幅は、ヘッドの位置誤差量に換算して数十 μm 程度になることもある。高トラック密度化を図るHDDでは、確実にヘッドによりデータを書き込み、または読出すための許容範囲は通常では0.数 μm 程度であり、この許容範囲を超える場合にはヘッドを目標トラックに追従させることは困難となる。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】従来のヘッド位置決め制御システムでは、前記のようなディスクの回転に伴うトラックの偏心に対して、ヘッドの位置決め精度を向上させるために、フィードバック制御系のゲインを上げて、その偏心の抑制率を向上させる方法がある。しかしながら、実際のHDDでは、ヘッドを搭載しているヘッドアクチュエータには機械的な共振要素が含まれており、単純にフィードバック制御系のゲインを上げることはできない。

【0011】また、通常のHDDでは、ディスク上に所定の間隔を以てサーボエリア（サーボセクタ）が配置されているセクタサーボ方式が採用されている。このセクタサーボ方式では、ヘッドの位置誤差情報は離散的にしか得られないため、位置情報のサンプリング周波数による制御帯域の制約を受けることになり、前記の偏心成分に対する抑制率を向上させることは困難である。従つ

て、従来のシステムは、本来ならば位置誤差成分をできるだけ小さくするように動作する必要があるが、偏心成分に対する抑制率を上げることが困難であるため、偏心に対してある位置誤差が保持された状態となる。このため、位置誤差が、データを書込み又は読出すための許容範囲をこえてしまうような事態となる。

【0012】図14と図15は、従来のヘッド位置決め制御システムにおいて、ヘッドを特定のトラックに位置決め制御したときの位置決め精度とそのスペクトルを示す測定例である。図14では、横軸はディスクの1回転におけるサーボセクタの位置（ここではサーボセクタ数は50を想定している）を示す。図14において、測定結果である曲線140cは平均値を示すものであり、曲線140aと140bとの誤差はディスクを回転させるスピンドルモータに同期の偏心成分によるものである。また、図15では、横軸は偏心成分の次数（偏心次数）を示す。ここでは、1, 2, 4次の偏心成分が十分に抑制されずに、繰り返し周期成分として残留していることを示している。要するに、従来のフィードバック制御系のシステムでは、ディスクの回転に伴うトラックの偏心成分を十分に抑制できないことがある。

【0013】また、位置誤差情報からディスクの回転に同期した偏心成分を抽出し、抽出された偏心成分を位置誤差に加算して、位置誤差に含まれる偏心成分を押圧する方法（例えば特開平4-324173号公報）では、偏心成分を完全に零にすることは困難である。

【0014】そこで、本発明の目的は、ヘッド位置決め制御システムにおいて、ディスクの回転に伴うトラックの偏心成分を十分に抑制できるようにして、ヘッドのトラックに対する追従誤差を低減して、結果的にヘッドの位置決め精度を向上させることにある。

【0015】

【課題を解決するための手段】本発明は、ヘッドにより読み出された前記サーボ情報に基づいて、前記ヘッドの位置と目標位置との位置誤差を検出するための位置誤差検出手段および位置誤差に応じてヘッドを目標位置に位置決めするための第1の制御操作量を算出する第1の算出手段を有するフィードバック制御系、および位置誤差検出手段により検出された位置誤差を観測し、位置誤差に含まれるディスクの回転に伴う偏心成分を検出する偏心成分検出手段および位置誤差から偏心成分を除去するための第2の制御操作量を算出する第2の算出手段を有するフィードフォワード制御系を併用したヘッド位置決め制御システムである。

【0016】このようなシステムにより、フィードバック制御系では抑制できない位置誤差に含まれる偏心成分（特にディスクの回転に同期する同期偏心成分）を抑制するための第2の制御操作量をフィードフォワード制御系により求めることができる。従って、位置誤差に含まれる偏心成分を低減して、結果的にヘッドの位置決め精

度を向上させることができる。

【0017】本発明の応用形態として、フィードフォワード制御系において、偏心成分が位置誤差量として許容範囲内であるか否かを判別する判別手段、及び偏心成分が許容範囲内の場合にはフィードフォワード制御の機能を停止させる手段を有するシステムである。このようなシステムであれば、位置誤差に含まれる偏心成分が十分に小さい場合には、フィードフォワード制御の機能を停止させることにより、フィードフォワード制御に必要なCPUの処理時間を低減させることができる。

【0018】本発明の応用形態として、フィードフォワード制御系において、ヘッドの目標位置であるディスク上のトラック情報に関する検出手段により検出された偏心成分を記憶するメモリ手段、及びトラック情報に基づいてメモリ手段に記憶された偏心成分または偏心成分検出手段により検出された偏心成分のいずれかを選択して第2の算出手段に入力させる選択手段を有するシステムである。このようなシステムであれば、トラック（シリンドラ）間で相関を有する偏心成分に対しては、他のトラックで検出した偏心成分を学習結果として利用することにより、偏心成分の検出処理に要する時間を低減させることができる。トラック間で相関を有する偏心成分とは、例えばディスクの伸縮に伴う偏心成分である。

【0019】本発明の応用形態として、磁気ディスク装置に設けられた衝撃検出手段から外部からの衝撃に応じた検出信号が入力されると、フィードフォワード制御の機能を停止させる手段を有するシステムである。外部からの衝撃があった場合には、位置誤差に含まれる偏心成分を正確に検出できない可能性が高い。そこで、衝撃検出手段により衝撃が検出された場合には、フィードフォワード制御の機能を停止することにより、誤った制御動作を行なうことを防止することができる。

【0020】

【発明の実施の形態】以下図面を参照して本発明の実施の形態を説明する。図1は本発明の第1の実施形態に関するヘッド位置決め制御システムの概念を説明するためのブロック図であり、図2は同実施形態に関するHDDのサーボ系の要部を示すブロック図である。

(ヘッド位置決め制御システムの構成) 本実施形態のシステムは、磁気ディスク装置であるHDDに適用するヘッド位置決め制御系であり、大別してフィードバック制御系とフィードフォワード制御系10とからなる。フィードバック制御系は、位置誤差検出部2と、制御要素4と、制御対象3とから構成されている。位置誤差検出部2は、ヘッドの目標位置rと実際のヘッド位置yとの位置誤差eを算出する減算部である。制御要素4は、位置誤差eを入力して、この位置誤差eを解消するような制御対象3に対する制御操作量Ubを算出する。制御対象3は、後述するように、具体的にはヘッドアクチュエータ

タを駆動するためのボイスコイルモータ(VCM)である。ここで、制御要素4及び制御対象3の各伝達関数をそれぞれ「Fb」と「Ps」とする。

【0021】一方、フィードフォワード制御系10は、偏心成分検出部(伝達関数Ft)11およびフィードフォワード制御部(伝達関数Fwとし、FW制御部と省略する)12を有する。偏心成分検出部11は、位置誤差検出部2の位置誤差eを入力して、位置誤差eに含まれるディスクの回転周期に同期した偏心成分を検出して、FW制御部12に出力する。FW制御部12は、後述するように、偏心成分を抑制するような制御操作量Ufを算出して、フィードバック制御系の加算部13に出力する。加算部13は制御要素4からの制御操作量UbとFW制御部12からの制御操作量Ufとを加算した制御操作量を制御対象3に出力する。

【0022】具体的には、フィードフォワード制御系10、制御要素4および加算部13は、後述するように、HDDのサーボ系のメイン要素1であるマイクロコントローラの制御プロセス(ファームウェアの実行)である。

(HDDのサーボ系の構成) 前述したように、本実施形態のシステムは、HDDのサーボ系に適用したものであり、図2に示すように、マイクロコントローラ110をメイン要素とする各要素により実現される。

【0023】まず、HDDでは、記録媒体であるディスク100はスピンドルモータ103に固定されて高速回転している。ディスク100は、多数の同心円状のトラック（シリンドラ）101が形成されている。各トラック101は複数のデータセクタに分割されている。さらに、ディスク100は、複数のサーボセクタ（ここでは50セクタ）102が所定の間隔で配置されている。サーボセクタ102には、前述したように、トラックコード（シリンドラコード）を示すトラック情報（シリンドラ情報）およびサーボバーストデータ（位置情報）を含むサーボ情報が記録されている。本実施形態のヘッド位置決め制御とは、主としてサーボバーストデータを使用したトラック追従制御を意味する。

【0024】ヘッド104はヘッドアクチュエータ105に搭載されている。ヘッドアクチュエータ105はVCM106により駆動されて、ヘッド104をディスク100の半径方向に移動させる。VCM106はVCMドライバ113から供給される駆動電流により駆動する。VCM106およびVCMドライバ113は、前記のシステムにおける制御対象3に含まれる。

【0025】ヘッドアンプ114は、ヘッド104により読み出されたサーボ情報を含むリード信号を增幅して出力する。サンプルホールド回路115は、システムの位置誤差検出部2に含まれる要素であり、サーボバーストデータの振幅値（通常では2相のバーストパターンA, BとC, Dからなる）をサンプルホールドし、マイクロ

コントローラ110に出力する。サンプルホールド回路115から出力される振幅値がヘッド104の目標位置 r （通常では目標トラックの中心）に対する位置誤差 e を示す。

【0026】マイクロコントローラ110は、前記のフィードフォワード制御系10、制御要素4および加算部13に相当する制御プロセスを実行するCPUをメイン要素とする。CPUはメモリに予め格納されたファームウェアの実行により、前記制御プロセスを実行する。マイクロコントローラ110は、A/Dコンバータ111により位置誤差 e をデジタル値に変換して入力する。また、マイクロコントローラ110は、算出した制御操作量（本実施形態では制御操作量 U_b と制御操作量 U_f とを加算した値）をD/Aコンバータ112によりアナログの電圧信号に変換してVCMドライバ113に出力する。但し、D/Aコンバータ112はVCMドライバ113側に設けられて、マイクロコントローラ110はデジタル値である制御操作量をVCMドライバ113に出力するような構成でもよい。

（第1の実施形態の作用効果）まず、HDDでは、ホストシステムからアクセスコマンドが発行されると、マイクロコントローラ110は、ディスク100上のアクセス対象の目標トラックまでヘッド104を移動させるシーク制御（速度制御）を実行する。このシーク制御では、マイクロコントローラ110はヘッド104により読み出されたサーボ情報に含まれるトラック情報（シリンド情報）に基づいて、ヘッド104の移動制御を実行する。

【0027】次に、ヘッド104が目標トラックの近傍に接近すると、マイクロコントローラ110はヘッド104を目標トラックの範囲内の目標位置（通常ではトラック中心）に位置決め整定させるためのトラック追従制御（位置制御）を実行する。本実施形態のシステムは、

$$e(t) = a_1 \sin \frac{2\pi}{T} t + a_2 \sin 2 \frac{2\pi}{T} t + a_3 \sin 3 \frac{2\pi}{T} t + \dots \\ + b_1 \cos \frac{2\pi}{T} t + b_2 \cos 2 \frac{2\pi}{T} t + b_3 \cos 3 \frac{2\pi}{T} t + \dots \\ + \frac{1}{2} c_0 \quad \left. \right\} (1)$$

【0031】ここで、 $a_1, a_2, a_3, \dots, b_1, b_2, b_3, \dots, c_0$ はフーリエ係数（1, 2, 3, …は偏心次数を意味する）であり、各偏心成分の大きさと位相を表す。各フーリエ係数は次式（2）により求めることができる。

トラック追従制御時の一連の動作を実行し、ヘッド104によりサーボ情報が読み出される毎に逐次実行する。

【0028】即ち、図1に示すように、ヘッド104によりサーボ情報のサーボバーストデータが読み出される度に、位置誤差検出部2は目標位置 r と実際のヘッド位置 y との位置誤差 e を検出する。制御要素4は、入力する位置誤差 e を解消するための制御操作量 U_b を算出して出力する。ここで、前述したように、位置誤差 e には、ディスク100の回転に伴うトラックの偏心成分が含まれていると想定すると、システムのフィードバック制御系だけでは偏心成分を十分に抑制できない。

【0029】そこで、フィードフォワード制御系10を併用することにより、偏心成分を十分に抑制するための制御操作量 U_f を求める。フィードフォワード制御系10では、偏心成分検出部11は位置誤差検出部2により求められる位置誤差 e を観測し、位置誤差 e に含まれるディスクの回転周期に同期した偏心成分を検出する。FW制御部12は、後述するように、偏心成分を抑制するような制御操作量 U_f を算出して、フィードバック制御系の加算部13に出力する。加算部13は制御要素4からの制御操作量 U_b とFW制御部12からの制御操作量 U_f とを加算した制御操作量を制御対象3に出力する。（偏心成分の検出処理）偏心成分検出部11は、具体的には位置誤差 e から特定の偏心成分をサイン（sin）成分とコサイン（cos）成分に分離し抽出する処理を実行する。位置誤差 e の中で、ディスクの回転周期に同期した偏心成分は、周期関数として捉えることができるので、フーリエ級数により展開表示することができる。即ち、ディスクの回転周期を T 、位置誤差の観測情報を $e(t)$ とすれば以下式（1）を求めることができる。

【0030】

【数1】

きる。

【0032】

【数2】

$$\left. \begin{aligned} a_m &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} e(t) \sin m \frac{2\pi}{T} t dt \\ b_m &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} e(t) \cos m \frac{2\pi}{T} t dt \\ c_0 &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} e(t) dt \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

m : 偏心次数

【0033】本実施形態のHDDではセクタサーボ方式を想定しているので、サーボ情報は離散的にしか得られないため、位置誤差eを時間的に連続な情報として得ることはできない。そこで、位置誤差eを離散的な情報と

して得る場合のフーリエ係数 $a_1, a_2, a_3, \dots, b_1, b_2, b_3, \dots$ を求める関係式(3)を以下に示す。

【0034】

【数3】

$$\left. \begin{aligned} a_m &= \frac{2Ts}{T} \sum_{i=1}^{\frac{T}{Ts}} e(i) \sin m \frac{2\pi}{T} t(i) \\ b_m &= \frac{2Ts}{T} \sum_{i=1}^{\frac{T}{Ts}} e(i) \cos m \frac{2\pi}{T} t(i) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Ts : サンプル時間

【0035】さらに、前記式(3)を数式的に変形して、1サンプル前までに得られた偏心成分のフーリエ係数に、現時点の観測情報により得られたフーリエ係数の変化分を逐次加算していく演算式として下記の関係式

$$\left. \begin{aligned} a_m(k) &= a_m(k-1) + \frac{2Ts}{T} e(k) \sin m \frac{2\pi}{T} t(k) \\ b_m(k) &= b_m(k-1) + \frac{2Ts}{T} e(k) \cos m \frac{2\pi}{T} t(k) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

【0037】この関係式(4)により、位置誤差情報を観測することにより、k時点での特定の偏心成分のsin成分とcos成分とを求めることができる。

(制御操作量Ufの算出処理) FW制御部12は、下記の関係式(5), (6)により、偏心成分検出部11に

$$e = \frac{1}{1 + F_b P_s} r + \frac{-P_s}{1 + F_b P_s} u_f \quad \cdots (5)$$

(4)を求めることができる。

【0036】

【数4】

より検出された偏心成分を抑制するような制御操作量Ufを算出する。まず、図1の制御系から位置誤差eの関係式(5)は以下のように求めることができる。

【0038】

【数5】

【0039】ここで、 F_b は制御要素4の伝達関数であり、 P_s は制御対象の伝達関数であり、 r は目標位置である。また、前記関係式(5)は、「 $e = r - y$ 」、「 $U_b = F_b \cdot e$ 」、「 $y = P_s (U_f + U_b)$ 」の関係式から求めることができる。前記の偏心成分検出部1により、「 $U_f = 0$ 」のときの位置誤差の特定偏心成

$$U_f = \frac{1 + F_b \cdot P_s}{P_s} \cdot e_0$$

【0041】以上のようにして、フィードフォワード制御系10により、位置誤差 e に含まれるディスクの回転周期に同期した偏心成分を検出し、この偏心成分を抑制するような制御操作量 U_f を算出することができる。フィードバック制御系の加算部13は、フィードバック制御系の制御操作量 U_b とフィードフォワード制御系10の制御操作量 U_f とを加算した制御操作量を制御対象3に出力する。従って、ディスクの回転周期に同期した偏心成分を十分に抑制したヘッド位置決め制御を実現することができる。

【0042】図3と図4は、本実施形態のヘッド位置決め制御システムにより、特定の目標トラックにヘッドを位置決め制御したときの位置決め精度とそのスペクトル

$$U_f = ((1 + F_b \cdot P_s) / F_b \cdot P_s) \cdot e_0 \dots (6a)$$

この制御操作量 U_f と位置誤差 e とを加算して制御要素4に入力すると、結果的には制御対象3に入力される制御操作量は、前記図1に示すシステムと同様に、制御要素4からの制御操作量 U_b とFW制御部12からの制御操作量 U_f とを加算したものと同様となる。要するに、本実施形態がフィードフォワード制御系10により制御操作量を補正する方式であるのに対して、本変形例1は検出した位置誤差を補正する方式である。

(第2の実施形態) 図5は第2の実施形態に関するブロック図である。第2の実施形態のシステムは、フィードフォワード制御系20に、所定の条件により制御系20を機能させるか否かを判別するための判別部21を設けた構成である。

【0044】本発明は、位置誤差 e に含まれるディスクの回転周期に伴う偏心成分(周期偏心成分)による位置誤差量を低減することにより、結果的に位置決め精度を向上させるシステムである。ここで、前記の偏心成分による位置誤差量が十分に小さい場合には、フィードフォワード制御系20が機能しても、位置決め精度は向上しない。

【0045】そこで、同実施形態では、フィードフォワード制御系20において、判別部21は、偏心成分検出部11により検出された偏心成分の値が、予め用意した基準値と比較して十分に小さい場合には、フィードフォワード制御系20の機能を停止させる。具体的には、判別部21は偏心成分検出部11からの偏心成分の値を入力して、予め用意した基準値と比較して、基準値以下で

分(e_0)を求める所以であるので、この特定偏心成分(e_0)を抑制するための制御操作量 U_f は結果的に次式(6)により求めることができる。

【0040】

【数6】

$$\dots (6)$$

を示す測定例である。図4の測定例に示すように、従来の場合(図15)と比較して、特に1, 2, 4次の偏心成分が十分に抑制されて低減していることが明白である。

(第1の実施形態の変形例1) 図16は本実施形態の変形例1を示すブロック図である。本変形例1は、本実施形態のシステムにおいて、加算部13を制御要素4の入力側に配置し、位置誤差検出部2の位置誤差 e とFW制御部12からの制御操作量 U_f とを加算した結果を制御要素4に入力する構成のシステムである。

【0043】この様なシステムにおいて、特定偏心成分(e_0)を抑制するための制御操作量 U_f を次式(6a)により求めたものと想定する。

$$U_f = ((1 + F_b \cdot P_s) / F_b \cdot P_s) \cdot e_0 \dots (6a)$$

あれば偏心成分検出部11の出力を停止させる。従って、フィードバック制御系の加算部13は、フィードバック制御系の制御操作量 U_b のみを制御対象3に出力することになる。なお、当然ながら、偏心成分検出部11からの偏心成分の値が基準値を越える場合には、判別部21はフィードフォワード制御系20の機能を維持して、偏心成分を抑制するための制御操作量 U_f をフィードバック制御系の加算部13に出力させる。

【0046】このような構成により、偏心成分による位置誤差量が十分に小さい場合には、フィードフォワード制御系20の機能を停止させるため、マイクロコントローラ110のCPUはフィードフォワード制御系20の制御プロセスを省略できる。従って、マイクロコントローラ110の制御プロセス全体の処理時間を低減することが可能となる。

(第3の実施形態) 図6は第3の実施形態に関するブロック図である。第3の実施形態のシステムは、フィードフォワード制御系30に、偏心成分の中で抑制対象の偏心次数を選定するための偏心次数選定部31を設けた構成である。

【0047】フィードフォワード制御系30は、位置誤差 e から検出した偏心成分を抑制するための制御操作量 U_f を算出する。このとき、偏心成分の中で、どの偏心次数の成分が位置決め精度を劣化させることになるかは、実際に位置誤差を測定するまでは予測が困難である。フィードフォワード制御系30は、位置決め精度を劣化させる偏心次数(前記式(2)のm)の成分を抑制

するための制御操作量 U_f を算出する必要がある。

【0048】そこで、同実施形態では、フィードフォワード制御系30において、偏心次数選定部31は、偏心成分検出部11により検出された偏心成分の結果に基づいて、位置決め精度を劣化させる偏心次数の偏心成分を選定し、FW制御部12に指示する。FW制御部12は、偏心次数選定部31により選定された偏心次数の偏心成分を抑制するための制御操作量 U_f を算出して、フィードバック制御系の加算部13に出力する。

【0049】このような構成により、予め抑制すべき偏心成分を固定化することなく、位置誤差から位置決め精度を劣化させて、抑制すべき偏心成分を選定することにより、位置決め精度を効果的に向上させる制御操作量 U_f を得ることができる。

(第4の実施形態) 図7は第4の実施形態に関するブロック図である。第4の実施形態のシステムは、フィードフォワード制御系40に、偏心成分検出部11により検出された偏心成分の結果(学習結果)をトラック(シリンドラ)毎に保持する保持部(メモリ)41、および保持部からトラック間で相関のある偏心成分の結果を判別する判別部42を設けた構成である。

【0050】ここで、位置誤差に含まれる偏心成分は、ディスク100(板)の変形(伸縮)やスピンドルモータ103の軸ぶれに起因するようなトラック間(シリンドラ間)において、ある程度相関のある同期成分(A)と、サーボ情報のサーボライト時にディスクの回転に非同期の偏心成分(NRR0成分)が固定化されたトラック間で相関のない同期成分(B)とに大別される。

【0051】相関のある同期成分(A)については、メモリ41に保持することにより、他のトラックに対して偏心成分の検出処理(再学習に相当する)を行なう必要がない。そこで、同実施形態のシステムでは、フィードフォワード制御系40において、保持部(メモリ)41は、偏心成分検出部11により検出された偏心成分の結果を複数のトラック分だけ記憶する。判別部42は、位置決め対象のトラック情報に基づいて、保持部41からトラック間で相関のある偏心成分のみを判別してFW制御部12に送る。当然ながら、保持部41にトラック間で相関のある偏心成分が記憶されていない場合には、偏心成分検出部11により検出された偏心成分をFW制御部12に送る。

【0052】このような構成であれば、あるトラックで学習した結果である偏心成分をメモリ41に保持すれば、相関のある他のトラックでの偏心の抑制に、メモリ41に保持された偏心成分を使用することが可能である。従って、ディスクの伸縮のような偏心成分はトラック間で、ある程度の相関がある場合には、既に検出処理されてメモリ41に保持された偏心成分を使用することができる。このため、ヘッド104を位置決めすべき目標トラック毎に偏心成分を検出する(学習する)ための

処理時間を低減することができる。

(第5の実施形態) 図8は第5の実施形態に関するブロック図である。第5の実施形態のシステムは、フィードフォワード制御系50に、偏心成分検出部11により特定のトラックに対して検出された偏心成分の結果に基づいて、他のトラックに対する偏心成分の結果を推定する推定部51を設けた構成である。

【0053】例えばディスク100のある内周トラック(内周シリンドラ)C1で求めた特定の偏心成分(特定周波数成分)をS1とし、また外周トラック(外周シリンドラ)C2で求めた特定の偏心成分をS2とすれば、1次近似で他のトラック(シリンドラ)CXの偏心成分(周波数成分)の推定値SXは、「 $SX = ((S2 - S1) / (C2 - C1)) \cdot CX + ((S1 \cdot C2 - S2 \cdot C1) / (C2 - C1))$ 」の関係式により算出することができる。同様に、測定ポイントを増やすことにより、N次近似で任意のトラックでの偏心成分を推定することが可能である。

【0054】そこで、同実施形態のシステムでは、フィードフォワード制御系50において、推定部51は前記の関係式に基づいて、特定トラックに対する偏心成分検出部11の検出結果(偏心成分)から指定されたトラック情報に対する偏心成分(周波数成分)の推定値SXを算出する。このようなシステムであれば、フィードフォワード制御系50の偏心成分検出部11の検出処理に要する時間を低減することができるため、結果的にマイクロコントローラ110の制御プロセス全体の処理時間を低減することが可能となる。

(第6の実施形態) 図9は第6の実施形態に関するブロック図である。第6の実施形態のシステムは、フィードフォワード制御系60に、偏心成分検出部11のフーリエ変換処理の初期値を設定するための保持部61を設けた構成である。

【0055】即ち、同実施形態のフィードフォワード制御系60では、前述したように、偏心成分検出部11は、現時点の位置誤差の観測情報により得られたフーリエ係数の変化分を逐次加算していく方式を想定している(関係式(4)を参照)。保持部61は、他のトラックに対する偏心成分検出部11の検出結果を保持し、次のトラックに対する検出処理(フーリエ変換処理)時に保持した検出結果を初期値として偏心成分検出部11に設定する。具体的には、前述の関係式(4)における $a_n(0)$, $b_n(0)$ を初期値として、偏心成分検出部11に設定する。

【0056】このような構成により、特にトラック間で相関のある偏心成分の検出処理において、他のトラックで得られた検出結果を初期値として使用することにより、フーリエ変換処理におけるフーリエ係数の収束時間を低減させることができるとなる。従って、偏心成分検出部11の検出処理時間(学習時間)の低減化を図ること

ができるため、結果的にマイクロコントローラ110の制御プロセス全体の処理時間を低減することが可能となる。

(第7の実施形態) 図10は第7の実施形態に関するブロック図である。第7の実施形態のシステムは、フィードフォワード制御系70に、衝撃センサ73からの検出信号に応じてフィードフォワード制御系70の機能を停止させる衝撃制御部71を設けた構成である。

【0057】HDDは、外部からの振動や衝撃を検知するための衝撃センサ73を設けて、許容範囲外の振動や衝撃を受けた場合に、データのリード／ライト動作を停止させる機能を備えている。ここで、システムが位置決め制御の実行中に、振動や衝撃を受けた場合に、フィードフォワード制御系70において偏心成分の検出動作が誤動作する可能性が高い。

【0058】そこで、同実施形態のシステムでは、衝撃制御部71は衝撃センサ73から検出信号が入力されると、スイッチ72をオフして偏心成分検出部11への位置誤差eの入力を停止させて、かつ偏心成分検出部11に対して検出動作の中止を指示する。これにより、衝撃や振動が発生したような異常状態でのフィードフォワード制御系70の機能を停止させることができる。

【0059】なお、フィードバック制御系では、加算部74により、衝撃センサ73からの検出結果を制御装置量Ubに加算することにより、衝撃や振動による制御補償を実現している。

(第8の実施形態) 図11は第8の実施形態に関するブロック図である。第8の実施形態のシステムは、フィードバック制御系での位置決め精度を観測し、位置決め精度が許容範囲外の場合(劣化した場合)に、フィードフォワード制御系10を機能させるための制御部80を設けた構成である。

【0060】即ち、本発明の要旨は、フィードバック制御系ではトラックの偏心成分により十分な位置決め精度が得られない場合を想定して、フィードフォワード制御系10を併用させた方式である。換言すれば、フィードバック制御系において十分な位置決め精度(許容範囲内の精度)が得られるならば、フィードフォワード制御系10の処理を実行することは処理時間が長くなり、逆にシステムの性能を低下させる要因となる。

【0061】そこで、同実施形態のシステムでは、制御部80はフィードバック制御系の位置誤差検出部2からの位置誤差eを監視し、位置決め精度が所定の基準値を維持している場合には、スイッチ81, 82をオフしてフィードフォワード制御系10をフィードバック制御系から分離する制御を実行する。換言すれば、制御部80はフィードバック制御系の位置誤差検出部2からの位置

誤差eを監視し、位置決め精度が所定の基準値より低下するように悪化した場合には、スイッチ81, 82をオンしてフィードフォワード制御系10をフィードバック制御系に接続して前述の第1の実施形態と同様の偏心成分に対する補償処理を実行させる。

【0062】また、制御部80は、位置決め精度の判定以外に、例えばデータの書き込み動作時にライトオルートが規定回数を越えて発生した場合には、スイッチ81, 82をオンしてフィードフォワード制御系10を機能させる制御を実行してもよい。要するに、フィードバック制御系において十分な位置決め精度が得られるならば、フィードフォワード制御系10の機能を停止させて、フィードフォワード制御系10の処理時間だけシステムの処理時間を低減させることができる。

(第9の実施形態) 図12は第9の実施形態に関するブロック図である。第9の実施形態のシステムは、前述した第4の実施形態のシステム(図7を参照)の応用形態に相当する内容である。即ち、同実施形態のシステムでは、フィードフォワード制御系90において、保持部(メモリ)91は、偏心成分検出部11により検出された偏心成分の結果(学習結果)を、ディスク100上の例えば内周エリア、外周エリア、中周エリアの複数エリア毎に保持し、かつヘッド別(ディスク100のデータ面別)に保持する。そして、判別部92は、ヘッド情報やトラック情報(シリンド情報)に基づいて、保持部91からヘッドやエリア毎でトラック間で相関のある偏心成分の結果を判別する。

【0063】このような構成であれば、あるトラックで学習した結果である偏心成分をヘッドやエリア毎にメモリ91に保持することになるため、ヘッドやエリア毎に相関のある他のトラックでの偏心の抑制に、メモリ91に保持された偏心成分を使用することが可能である。このため、ヘッド104を位置決めすべき目標トラック毎に偏心成分を検出する(学習する)ための処理時間を低減することができる。

(第1の実施形態の変形例2) 前述したように、第1の実施形態(他の各実施形態も同様である)のフィードフォワード制御系では、偏心成分検出部11はフーリエ変換処理により特定周波数成分である偏心成分を抽出するときに、前記関係式(4)により、位置誤差情報を観測することにより、k時点での特定の偏心成分のsin成分とcos成分とを算出する。ここで、前記関係式(4)を変形することにより、下記式(7)を得ることができる。

【0064】

【数7】

$$\left. \begin{aligned} a_m(k) &= a_m(k-1) + e(k) \frac{2Ts}{T} \sin m \frac{2\pi}{T} t(k) \\ b_m(k) &= b_m(k-1) + e(k) \frac{2Ts}{T} \cos m \frac{2\pi}{T} t(k) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

【0065】前記式(7)において、sin成分とcos成分を予めテーブル化した結果をメモリに保持するこ^トにより、下記式(8)に示すような単純な積和演算に

$$\left. \begin{aligned} a_m(k) &= a_m(k-1) + e(k) \cdot \text{TABLE(sec ter)} \\ b_m(k) &= b_m(k-1) + e(k) \cdot \text{TABLE(sec ter)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

【0067】ここで、「TABLE(sec ter)」がsin成分とcos成分をテーブル化した結果を示す。このような方式により、マイクロコントローラ110のCPUが前記関係式(4)の演算を実行するとき、sin成分とcos成分の結果をメモリに記憶したテーブル情報から得られるため、CPUの演算処理の負荷を大幅に軽減させることができる。特にマイクロコントローラ110のCPUとして、整数演算をメインとする低コストのCPUを使用することが可能となり、システムのコスト削減などの効果が得られる。

【0068】なお、各実施形態のフィードフォワード制御系については、フィードバック制御系からサーボ情報のサーボバーストデータに基づいて得られる位置誤差から偏心成分の検出処理を実行する方式について説明した。しかし、ヘッドがトラックを渡るような巨大な位置誤差が発生している場合には、サーボバーストデータのみでは正確な位置誤差を検出することはできない。そこで、フィードバック制御系において、サーボバーストデータだけでなく、トラック情報(シリンドラ情報)を使用した位置誤差を検出することにより、フィードフォワード制御系は正確な位置誤差から偏心成分の検出処理を実行することができる。従って、フィードフォワード制御系による偏心抑制の性能を向上させることができるとなる。

【0069】また、第1の実施形態(他の各実施形態も同様である)のフィードフォワード制御系では、FW制御部12は、前記関係式(6)に示すように、フィードバック制御系の伝達関数(Fb, Ps)との関係に基づいて偏心成分を抑制するような制御操作量Ufを算出する。このフィードバック制御系の伝達関数を例えればデジタルフィルタにより実現した場合に、効果的な制御操作量Ufを求めることが可能となり、偏心成分の抑制率を理論上では無限大にすることができます。

【0070】

【発明の効果】以上詳述したように本発明によれば、ヘッド位置決め制御システムにおいて、フィードバック制御系とフィードフォワード制御系とを併用する方式により、ディスクの回転に伴うトラックの偏心成分を十分に

変換することができる。

【0066】

【数8】

抑制することができる。従って、ヘッドのトラックに対する追従誤差を低減して、結果的にヘッドの位置決め精度を向上させることができるとなる。特に、ディスク上にサーボ情報を書き込むときに、ディスクを実装するHDD自体ではなく、サーボライタと呼ばれる専用のサーボ情報書き込み装置を使用することができる。このような場合には、サーボ情報を書き込んだディスクをHDDに装着したときに、スピンドルモータの回転中心と、サーボライタによりサーボ情報を書き込んだときのディスクの取り付け位置での回転中心との誤差により、巨大な偏心が発生する可能性がある。このようなHDDに本発明を適用することにより、偏心成分を十分に抑制してヘッド位置決め精度を向上させることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施形態に関するヘッド位置決め制御システムの概念を説明するためのブロック図。

【図2】同実施形態に関するHDDのサーボ系の要部を示すブロック図。

【図3】同実施形態に関するシステムの位置決め精度を示す測定結果。

【図4】同実施形態に関するシステムの偏心成分の特性を示す測定結果。

【図5】第2の実施形態に関するヘッド位置決め制御システムの概念を説明するためのブロック図。

【図6】第3の実施形態に関するヘッド位置決め制御システムの概念を説明するためのブロック図。

【図7】第4の実施形態に関するヘッド位置決め制御システムの概念を説明するためのブロック図。

【図8】第5の実施形態に関するヘッド位置決め制御システムの概念を説明するためのブロック図。

【図9】第6の実施形態に関するヘッド位置決め制御システムの概念を説明するためのブロック図。

【図10】第7の実施形態に関するヘッド位置決め制御システムの概念を説明するためのブロック図。

【図11】第8の実施形態に関するヘッド位置決め制御システムの概念を説明するためのブロック図。

【図12】第9の実施形態に関するヘッド位置決め制御システムの概念を説明するためのブロック図。

【図13】従来のヘッド位置決め制御システムでのフィードバック制御系を示すブロック図。

【図14】従来のヘッド位置決め制御システムの位置決め精度を示す測定結果。

【図15】従来のヘッド位置決め制御システムの偏心成分の特性を示す測定結果。

【図16】第1の実施形態の変形例1に関するブロック図。

【符号の説明】

1…サーボ系のメイン要素

2…位置誤差検出部

3…制御対象

4…制御要素

10…フィードフォワード制御系

11…偏心成分検出部

12…F W制御部（フィードフォワード制御部）

13…加算部

100…ディスク

101…トラック（シリンダ）

102…サーボセクタ

103…スピンドルモータ

104…ヘッド

105…ヘッドアクチュエータ

106…ボイスコイルモータ（VCM）

110…マイクロコントローラ

111…A/Dコンバータ

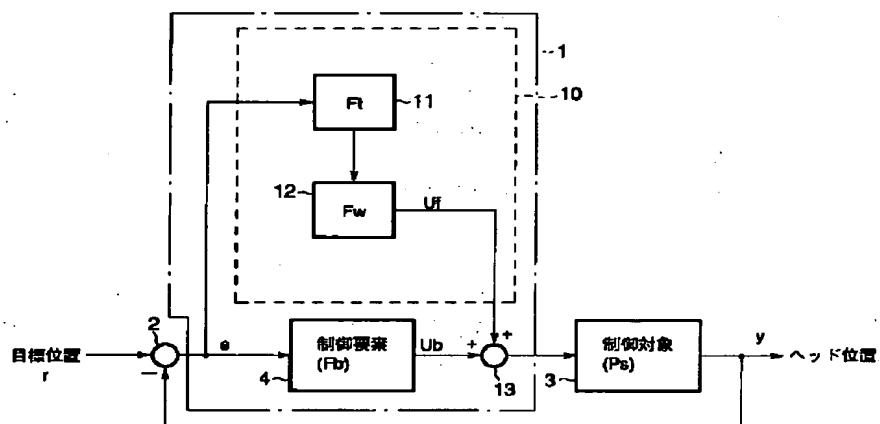
112…D/Aコンバータ

113…V CMドライバ

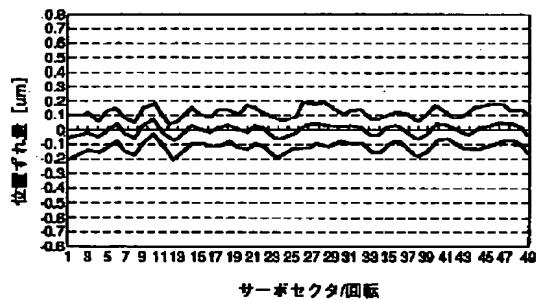
114…ヘッドアンプ

115…サンプルホールド回路

【図1】



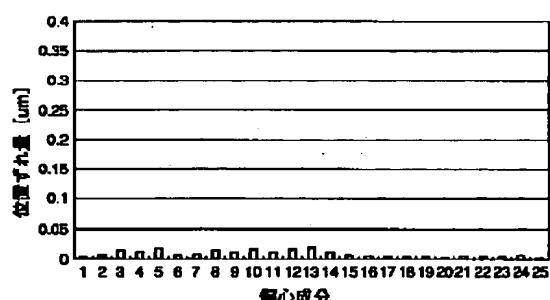
【図3】



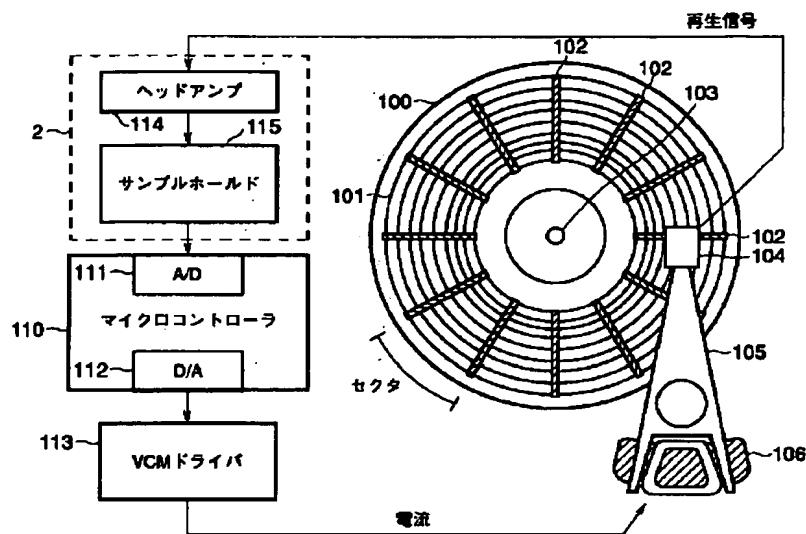
【図13】



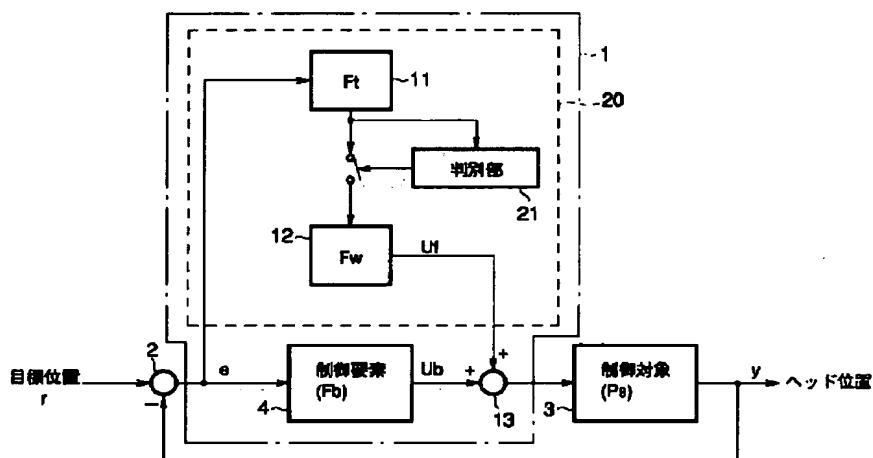
【図4】



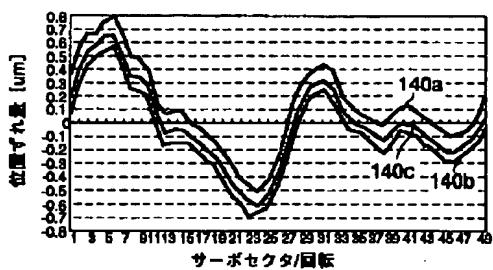
【図2】



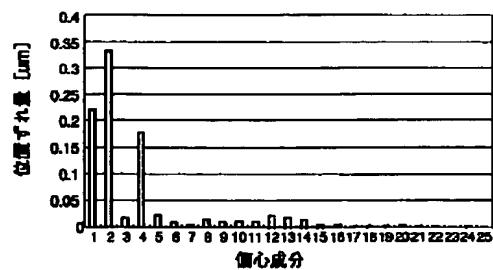
【図5】



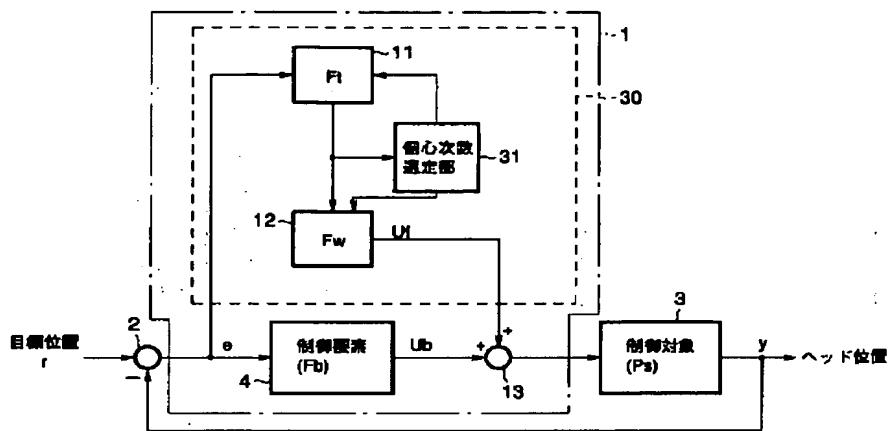
【図14】



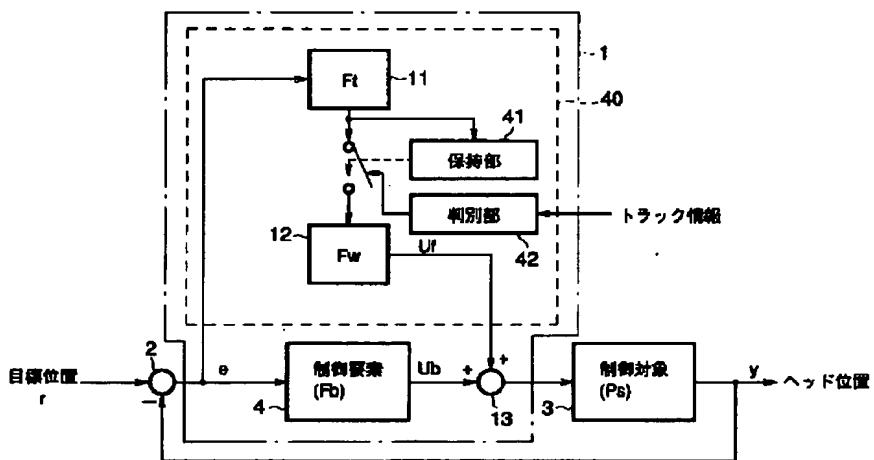
【図15】



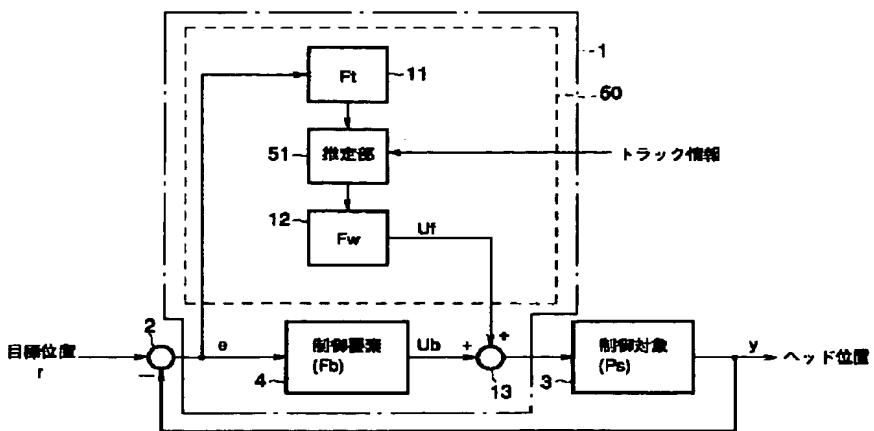
【図6】



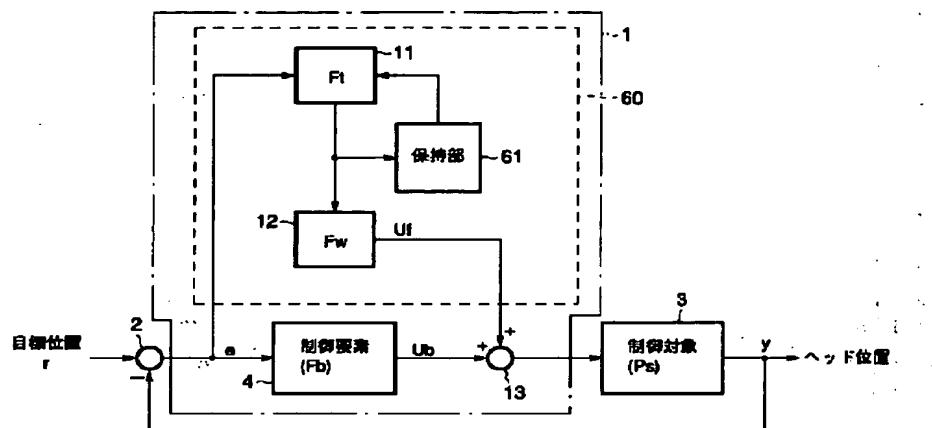
【図7】



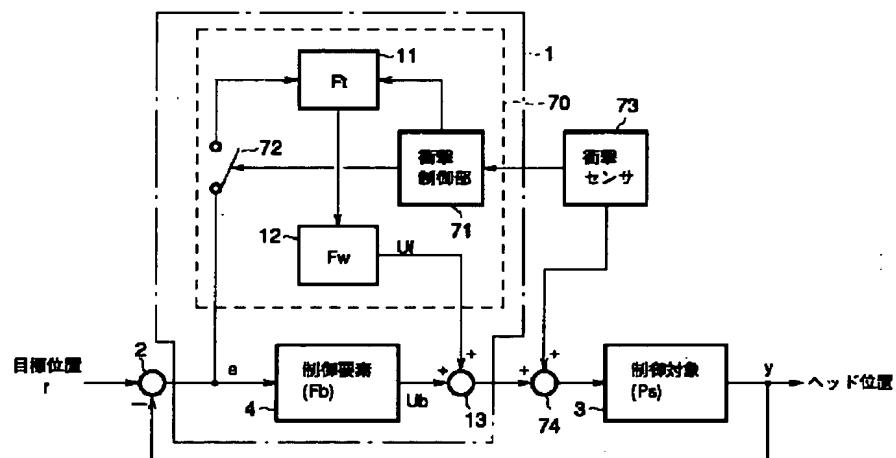
【図8】



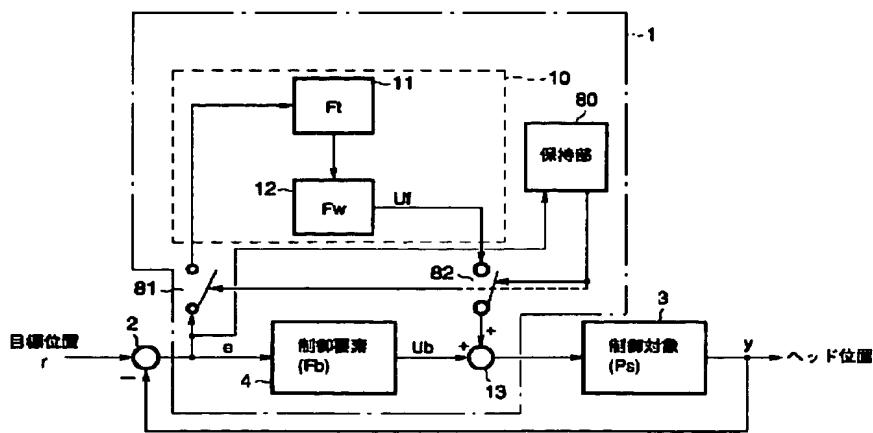
【図9】



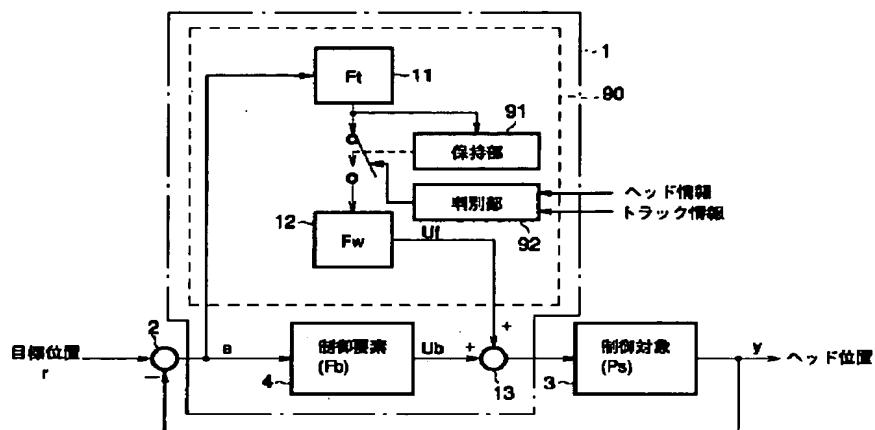
【図10】



【図11】



【図12】



【図16】

